

Научная статья
УДК 551.345, 536.5, 624.139
DOI: 10.21209/2227-9245-2024-30-3-58-69

Статистические характеристики данных температурного мониторинга грунтовых оснований фундаментов зданий города Салехарда за 2018–2023 годы как основа для автоматизации процесса первичной обработки данных

Александр Николаевич Шеин¹, Анна Александровна Башкова²

^{1,2}Научный центр изучения Арктики, г. Салехард, Россия

² Институт криосферы Земли Тюменского научного центра Сибирского отделения Российской академии наук, г. Тюмень, Россия

¹ A.N.Shein@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6520-0551>,

² AABashkova@yanao.ru, <https://orcid.org/0009-0007-1489-0701>

Информация о статье

Поступила в редакцию
29.05.2024

Одобрена после
рецензирования 29.07.2024

Принята к публикации
06.08.2024

Ключевые слова:

термометрия, мерзлота, многолетнемёрзлые грунты, мониторинг, свайный фундамент, Арктика, Ямал, объект капитального строительства, геотехническая безопасность, климатические изменения

В настоящее время Арктика представляет собой динамично развивающуюся территорию, на которой возведение и эксплуатация инфраструктуры осложнены наличием мёрзлых грунтов. Климатические изменения и антропогенные факторы отрицательно сказываются на их состоянии. В этой связи актуальны исследования текущего и прогнозного состояния мерзлоты в естественных и антропогенных условиях, что необходимо для формирования планов по адаптации к климатическим изменениям, проектных и изыскательных работ, управления рисками. Проведение мониторинга температурного режима грунтов в основании действующей инфраструктуры представляется наиболее очевидным решением для контроля состояния мерзлоты. Объект исследования – грунтовое основание зданий, возведённых на мёрзлых грунтах. Предмет исследования – данные, полученные с помощью системы автоматизированного контроля температуры грунтов оснований объектов капитального строительства в г. Салехарде. С целью выявления на ранних этапах негативных изменений в несущей способности мёрзлых грунтов решается задача определения набора критериев на основе анализа данных температурного мониторинга и их статистических характеристик. В г. Салехард в основании 30 зданий пробурены скважины на глубину заложения фундамента, куда смонтировано термометрическое оборудование. Датчики измеряют температуру грунтов каждые 3 ч и передают её на сервер для анализа. Как результат исследования, показана возможность использования амплитуды годовых колебаний температуры грунтового основания и мощности сезонно-талого слоя под зданием для оценки эффективности работы системы термостабилизации грунтов. Анализируя средние и максимальные значения температуры в основаниях объектов, можно выявлять объекты с ослабленными зонами. Приведён набор критериев для выявления объектов с негативными изменениями в мёрзлом грунтовом основании, а статистические характеристики могут послужить основой для автоматизации процесса обработки данных мониторинга. Получаемая информация о параметрах мёрзлых грунтов под зданиями позволит определить текущее состояние грунтовых оснований и спрогнозировать развитие ситуации с целью предотвращения разрушений инфраструктуры.

Благодарности: работа выполнена в рамках проекта Западно-Сибирского межрегионального научно-образовательного центра «Прогноз деградации мерзлоты и технология автоматизированного контроля несущей способности мёрзлых грунтов под объектами капитального строительства» при поддержке Правительства Ямало-Ненецкого автономного округа. Авторы выражают благодарности специалистам участка инженерных изысканий Научного центра изучения Арктики за создание мониторинговой инфраструктуры.

Original article

Statistical Characteristics of the Data of Temperature Monitoring of the Soil Bases of the Foundations of Buildings in Salekhard for 2018–2023 as a Basis for Automating the Process of Primary Data Processing

Alexander N. Shein¹, Anna A. Bashkova²

^{1,2}Arctic Research Center, Salekhard, Russia

²Institute of the Earth's Cryosphere, Tyumen Scientific Center, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

¹A.N.Shein@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6520-0551>

²AABashkova@yanao.ru, <https://orcid.org/0009-0007-1489-0701>

Information about the article

Received May 29, 2024

Approved after review
June 29, 2024

Accepted for publication
August 6, 2024

Keywords:

thermometry, permafrost, frozen soils, monitoring, pile foundation, Arctic, Yamal, capital construction facility, geotechnical safety, climate change

The Arctic today is a dynamically developing territory where the construction and operation of infrastructure are complicated by the presence of permafrost. Climatic changes and anthropogenic factors have a negative impact on their condition. In this regard, studies of the current and forecast state of permafrost in natural and anthropogenic conditions are relevant, which is necessary for the formation of plans for adaptation to climate change, design and engineering surveys work, and risk management. Monitoring the temperature regime of soils at the base of the existing infrastructure seems to be the most obvious solution for monitoring the state of permafrost. The object of the study is the soil foundation of buildings erected on permafrost. The subject of the study is data obtained using an automated soil temperature control system for the foundations of capital construction facilities in Salekhard. For the purpose of identifying negative changes in the bearing capacity of permafrost at early stages, the task of determining a set of criteria based on the analysis of temperature monitoring data and their statistical characteristics is solved. In Salekhard wells were drilled at the base of 30 buildings to the depth of the foundation, where thermometric equipment was installed. The sensors measure the soil temperature every 3 hours and transmit it to the server for analysis. As a result, the possibility of using the amplitude of annual fluctuations in the temperature of the soil base and the capacity of the seasonal melt layer under the building to assess the effectiveness of the soil thermal stabilization system is shown. By analyzing the average and maximum temperature values in the bases of objects, it is possible to identify objects with weakened zones. A set of criteria is given for identifying objects with negative changes in the frozen base, and statistical characteristics can serve as a basis for automating the process of processing monitoring data. The information obtained on the parameters of permafrost under buildings will allow us to determine the current state of the soil foundations and predict the development of the situation in order to prevent the destruction of infrastructure.

Acknowledgments. The work was carried out within the framework of the project of the West Siberian Interregional Research Center "Forecast of permafrost degradation and technology of automated control of the bearing capacity of frozen soils under capital construction facilities" with the support of the government of the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug. The authors are grateful to the specialists of the engineering survey section of the Arctic Research Center for the creation of a monitoring infrastructure.

Введение. Мерзлота занимает значительную (60–65%) часть северной территории РФ. Освоение Арктики осложняют не только суровые условия и труднодоступные территории, но и мёрзлые породы. Возведение и дальнейшая эксплуатация инфраструктуры в таких условиях требуют особого подхода [9]. Трудности возникают вследствие не только сложного строения пород, но и ускорившихся в последнее время процессов деградации мерзлоты ввиду потепления климата. Например, по данным метеостанции г. Салехарда, в настоящее время среднегодовая температура воздуха составляет около 4,3 °С, а годовая сумма осадков – око-

ло 500 мм, тогда как в начале метеонаблюдений (в 1882 г.) эти величины составляли 8,2 °С и 180 мм соответственно. Наиболее активно температура воздуха повышалась в последние 30 лет. За 1990–2021 гг. величина линейного тренда составила +0,06 °С/год, по осадкам – +2,08 мм/год [3].

Такие климатические изменения приводят к деградации многолетнемёрзлых пород (далее – ММП) и, как следствие, к потере несущей способности грунтов. Сохранность инфраструктуры в северных странах подвергается рискам разрушения. Под ударом оказываются целые города и промышленные объекты, возведённые на вечномёрзлых

грунтах. В связи с этим возникает необходимость изучать динамику состояния ММП, строить модели и делать прогнозы развития ситуации, используя уже имеющийся набор данных. Для этого разработано множество климатических моделей CGCM2, CSM–1.4, ECHAM4/OPYC3, GFDL–R30c, HadCM3¹, пересматриваются строительные нормы и правила, развиваются направления геотехнического мониторинга.

Актуальность исследования. Избежать последствий изменения состояния ММП можно, применяя планомерное и системное научно-методическое сопровождение всех проектов, реализуемых на мёрзлых грунтах, тем более что весь комплекс (инженерные изыскания и проектирование), призванный обеспечить надежность строительства и эксплуатации зданий и сооружений в области распространения ММП в РФ, находится в глубоком кризисе. Современные нормативные документы², за редким исключением, не составлены на основе новой информации, а «актуализированы» редактированием старых путём сокращения требований к выполнению наиболее наукоёмких работ и исследований в составе инженерных изысканий. Нужно заметить, что зарубежные стандарты не отличаются наукоёмкостью, но в них заложен более значительный запас несущей способности грунтов – 2,5–3 за рубежом вместо 1,05–1,56 в РФ [9].

Соответственно, в последнее время крайне актуальны исследования текущего и прогнозного состояния мерзлоты, что необходимо для формирования планов по адаптации к климатическим изменениям, проектных, изыскательных работ и контроля их производства, управления рисками и т.д.

Очевидно, что учесть все факторы воздействия на вечную мерзлоту в антропогенных условиях крайне сложно. Тем не менее, проведение мониторинга температурного режима грунтов в основании действующей инфраструктуры представляется наиболее очевидным выходом из сложившейся ситуации.

¹ Data Distribution Centre of IPCC. – URL: <https://www.ipcc-data.org/sim/index.html> (дата обращения: 12.04.2024). – Текст: электронный; Intergovernmental Panel on Climate Change. – URL: <https://www.ipcc.ch> (дата обращения: 12.04.2024). – Текст: электронный.

² ГОСТ 19804-2012 «Сваи железобетонные заводского изготовления. Общие технические условия» // Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации (МГС). – М.: Стандартинформ, 2014. – 20 с.; СП 25.13330.2020 «Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. Актуализированная редакция СНиП 2.02.04-88. – М., 2020. – 135 с.

Объект исследования – грунтовое основание объектов капитального строительства, возведённых на мёрзлых грунтах.

Предмет исследования – данные, полученные с помощью системы автоматизированного контроля температуры грунтов оснований объектов капитального строительства в г. Салехарде.

С целью выявления на ранних этапах негативных изменений в несущей способности мёрзлых грунтов и своевременного реагирования на них с возможностью автоматизации процесса решается **задача** определения набора критериев на основе анализа данных температурного мониторинга и их статистических характеристик.

Материалы и методы исследования.

Система автоматизированного контроля температуры грунтов оснований объектов капитального строительства в настоящее время апробируется в г. Салехарде и является составляющей региональной сети наблюдения за мерзлотой. Получаемая информация о температуре мёрзлых грунтов под зданием позволит определить текущее состояние грунтового основания и спрогнозировать развитие ситуации. С 2018 г. в г. Салехарде оборудовано более 300 термометрических скважин под 34 капитальными объектами округа. Данные с приборов поступают на сервер в автоматическом режиме и собираются в единую систему хранения и визуализации геокриологической информации ГИС «ЯМАЛ-АРКТИКА» (<https://monitoring.arctic.yanao.ru>)³ [2]. Для специалистов и всех заинтересованных лиц предусмотрен полный доступ к ресурсу, где отображаются объекты мониторинга с информацией по расположению скважин, возможностью отображения в виде графиков и экспорта полученных данных.

Для анализа использовались температуры грунтов, полученные в основаниях 30 зданий г. Салехарда, где термометрические скважины оснащены оборудованием производителей «ИП Кураков» (г. Томск) и ООО «Русгетех» (г. Москва). Установленные комплекты термометрической аппаратуры прошли тестирование и были запрограммированы на период измерения 3 ч в соответствии с периодом измерения ближайшей метеостанции в аэропорту г. Салехарда. Погрешность калибровки датчиков измерения температуры составляет $\pm 0,1$ °С, а разрешающая способность измерения температуры – 0,07 °С.

³ System of automated geocryological monitoring. – URL: <https://monitoring.arctic.yanao.ru> (дата обращения: 12.04.2024). – Текст: электронный.

Разработанность темы исследования. Несмотря на очевидную актуальность для России, научное направление по изучению современного состояния ММП и прогнозированию развития ситуации в зонах вечной мерзлоты потеряло поколение специалистов, а новый импульс получен только после 2020 г., когда случилась Норильская катастрофа. Тем не менее, исследования по данной тематике продолжались.

Наиболее значимые с практической, экономической и социальной точек зрения – работы по прогнозированию устойчивости уже возведённых и проектируемых объектов капитального строительства и инфраструктуры на арктических и приарктических территориях, т.е. по оценке несущей способности многолетнемёрзлых грунтов. Этому посвящена целая серия работ [8; 15; 16], в которых утверждается, что несущая способность грунтов оснований зданий и сооружений за последние 60–70 лет в некоторых районах уменьшилась до 45 %. При текущем тренде потепления климата к 2050 г. несущая способность грунтов уменьшится ещё на 25 % и более. Проведены оценки потерь бюджетов различных стран от возможных разрушений, согласно которым суммы исчисляются сотнями миллиардов долларов [5; 6; 13].

Мощным импульсом для развития геотехнического мониторинга послужило развитие инфраструктуры топливно-энергетического комплекса (далее – ТЭК) в арктической и субарктической зонах. Особенно это заметно в Российской Федерации, где взрывными темпами развиваются коммерческие автоматизированные системы контроля устойчивости промышленных объектов¹ и, как следствие, развивается математическое моделирование процессов теплопереноса [4; 11] теоретические и алгоритмические основы [1; 10; 12], предлагаются нестандартные решения в сфере строительства [7].

Тем не менее, до сих пор отсутствует системный подход при геотехническом мониторинге в Арктике [14]. В том числе нет единого подхода для обработки получаемой информации, автоматизации контроля и критериям

аварийных ситуаций. Опытная система температурного мониторинга в г. Салехарде [2; 12] является одним из перспективных примеров для применения в основных населённых пунктах Арктики и последующего решения задач геотехнического мониторинга.

Результаты исследования. Анализ температур грунтов основания проводился для 30 объектов капитального строительства, сеть мониторинга под каждым из которых состоит из 4 термометрических скважин и более. В каждой скважине установлены датчики через 0,5 м до глубины 5 м и далее до 12 м каждый метр. Глубины для анализа выбраны в интервале 5–10 м как наиболее рабочие и значимые для стабильности свайного фундамента: сезонно-талый слой не превышает 5 м, а стандартная глубина заложения свай составляет 10 м.

На данный момент 6 объектов имеют мониторинговые ряды более двух лет, что позволяет проводить предварительный анализ температурного тренда для прогноза. Рассмотрим два из них. В основании здания I первые 4 скважины оборудованы в 2018 г. Имеется пятилетний временной ряд (рис. 1) с разрывом в 2020/2021 г. Несколько месяцев производилось обслуживание термометрического оборудования, поэтому принято решение исключить этот год при построении тренда. Температура грунтов основания здания II контролируется больше четырёх лет. Для построения среднего значения и линейного тренда использовались 4 года измерений (рис. 2).

Среднее значение и линия тренда, построенные по температурам на глубинах 5–10 м под зданием I, имеют отрицательный наклон. Температура понижается на 0,36 ежегодно. Такой нехарактерный тренд, противоположный климатическим изменениям, может формироваться по нескольким причинам. Во-первых, дом сдан в 2017 г. и, соответственно, сезонно-охлаждающие устройства продолжают эффективно работать в зимний период и охлаждать грунты. Во-вторых, вблизи одной из четырёх рассмотренных скважин обнаружена тепловая аномалия с положительными температурами [10; 12], которая со временем стабилизировалась. В-третьих, в расчётах участвует один из самых тёплых за последнее время зимних сезонов – 2019/2020 г. Принимая во внимание остальные скважины, образованные в конце 2020 г., тренд меняется на положительный. Такое изменение будет продемонстрировано на объекте, приведённом на рис. 2.

¹ Система мониторинга температуры от Русгеотех. – Текст: электронный // ООО «РУСГЕОТЕХ». – URL: <https://www.rgtekh.ru> (дата обращения: 01.06.2024); Система температурного мониторинга мёрзлых, промерзающих и протаивающих грунтов. – Текст: электронный // АО «Научно-производственное предприятие «Эталон». – URL: <https://omsketalon.ru/catalog/sistema-temperaturnogo-monitoringa-merzlyh-promerzayushchih-i-protaiyayushchih-gruntov> (дата обращения: 01.06.2024).

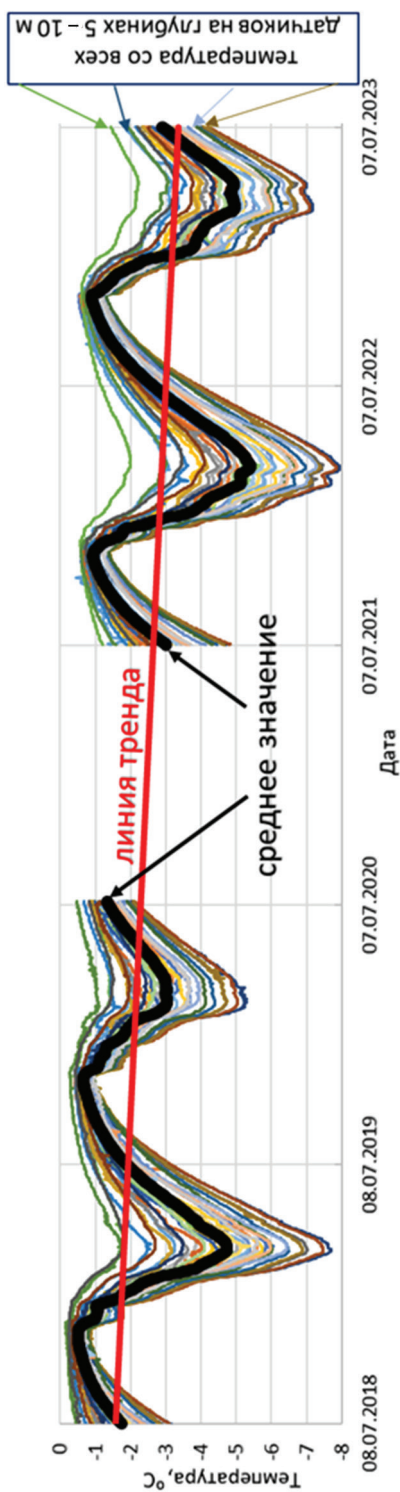


Рис. 1. Температурные данные на глубинах 5–10 м под зданием I в г. Салехарде за 2018–2023 гг. и их статистические характеристики: чёрная линия – среднее значение, красная прямая – линия тренда /

Fig. 1. Temperature data at depths of 5–10 m under building I in Salekhard for 2018–2023 and their statistical characteristics: the black line – the average value, the red line – the trend line

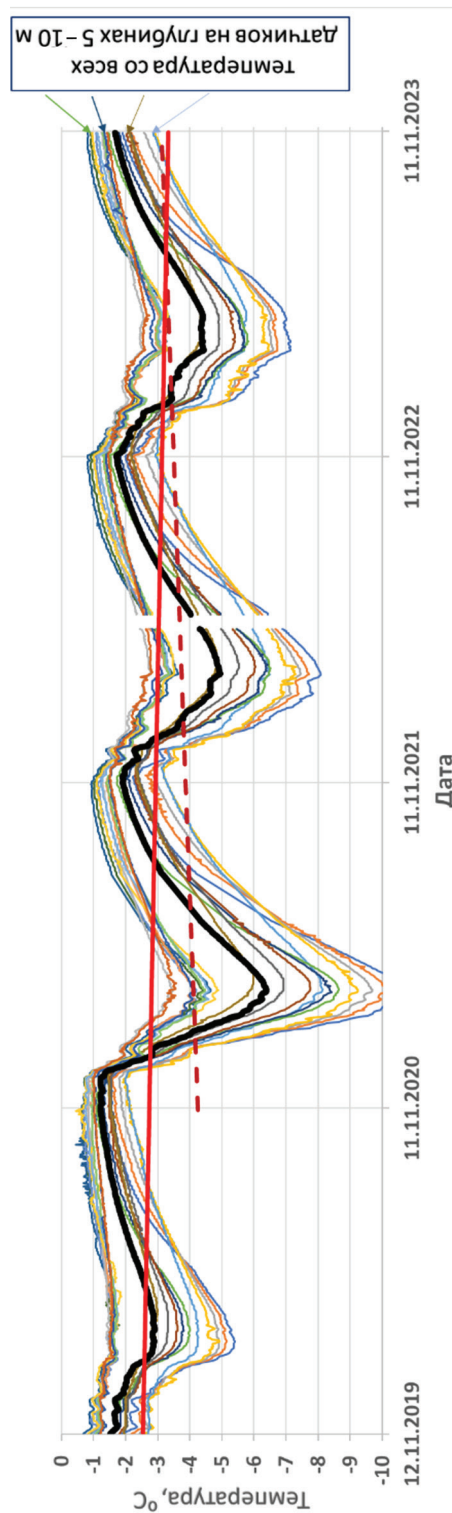


Рис. 2. Температурные данные на глубинах 5–10 м под зданием II в г. Салехарде за 2019–2023 гг. и их статистические характеристики: чёрная линия – среднее значение, красная сплошная прямая – линия тренда за 2019–2023 гг. /

Fig. 2. Temperature data at depths of 5–10 m under building II in Salekhard for 2019–2023 and their statistical characteristics: the black line is the average value, the red solid straight line is the trend line for 2019–2023, the red dash straight line is the trend line for 2020–2023

Температурные данные на глубинах 5–10 м под зданием II в г. Салехарде за 2019–2023 гг., средние значения и линии тренда по 3 и 4-м годам приведены на рис. 2. Полученный за 4 года линейный тренд имеет отрицательный наклон. Температура понижается на 0,2 °С ежегодно. Отрицательный наклон обеспечивает тёплый зимний сезон 2019/2020 гг., что можно наблюдать на рис. 2: охлаждение грунтов в этот период происходило хуже в среднем до -3 °С, в последующие годы – от -4 до -6 °С. При таком тренде температурные показатели не снижают несущую способность фундамента.

Если рассмотреть только последние три года, то тренд изменится на положительный (см. рис. 2, красная пунктирная кривая). Температура повышается на 0,37 °С ежегодно. При современной среднегодовой температуре грунтов в основании фундамента -3 °С приближение к критическим нулевым значениям произойдёт меньше чем через 10 лет. Однако стоит понимать, что тренд будет изменяться по мере увеличения временного ряда. Сами температуры грунтов могут зависеть не только от климатических колебаний, что видно на примере тёплого зимнего сезона 2019/2020 гг., но и от качества эксплуатации объекта. Таким образом, использование рядов мониторинга длиной не менее двух лет с ежегодным пересчётом линейного тренда позволяет оценить момент начала перехода грунтов в талое состояние и, как следствие, существенное снижение их несущей способности. В перспективе, после получения соответствующих рядов, полученные значения изменения температуры можно использовать в качестве одного из критериев стабильности грунтового основания и здания.

Если рассматривать дома с рядами не менее 1 года, можно проанализировать амплитуду колебаний температуры грунтов по всей контролируемой глубине в течение года, выделить максимальную глубину нулевых изотерм (мощность сезонно-талого слоя). Первый показатель может охарактеризовать эффективность работы сезонных охлаждающих устройств (далее – СОУ), а второй – качество содержания/эксплуатации и возможные нарушения режима работы проветриваемого подполья (далее – РРПП), определённого проектом. Рассмотрим два объекта мониторинга с отличающимся характером работы технологии термостабилизации грунтов (СОУ и ПП): на одном СОУ находятся в рабочем состоянии, на другом их эффективность не наблюдается.

Под зданием III в 2023 г. силами Научного центра изучения Арктики пробурено и оборудовано 6 термометрических скважин глубиной 12 м по равномерной сети. Рассмотрим температуру за 10.07.2023 г. и 10.11.2023 г. (рис. 3, пунктирные и сплошные линии соответственно) по глубине во всех скважинах. За исключением сезонно-талого/мёрзлого слоя в середине лета температура грунтов ещё близка к минимальной за год, а в ноябре наоборот – температуры поднимаются до максимальных значений.

Температурное поле в основании здания III изменяется в отрицательной зоне в пределах от -0,8 до -4,5 °С (см. рис. 3). Колебания температур в течение полугода достигают нескольких градусов практически по всей глубине, что говорит о рабочем состоянии СОУ и правильном РРПП на данном объекте. Можно выделить скважину 236-5 (см. рис. 3, синяя кривая), где амплитуда колебаний и температура отличаются от остальных. Сезонно-талый слой находится на уровне 2 м под всем зданием, за исключением зоны вблизи скважины 236-5, где он опускается до 3,5 м. Причины отличий грунтового-мерзлотных условий вблизи скважины 236-5 в настоящее время не установлены.

Под зданием IV в 2023 г. силами Научного центра изучения Арктики пробурено и оборудовано 11 термометрических скважин глубиной 12 м по равномерной сети. Рассмотрим температуру за 15.06.2023 г. и 20.11.2023 г. (рис. 4, круглые маркеры и сплошные линии соответственно) по глубине во всех скважинах. За исключением сезонно-талого/мёрзлого слоя в начале лета грунты находятся в максимально охлаждённом состоянии, а в ноябре наоборот – температуры поднимаются до максимальных за год значений.

Температурное поле в основании здания изменяется в отрицательной зоне в пределах от -0,2 до -4 °С. Основные колебания температуры происходят на глубинах до 8 м: -4 °С – в июне, -2 °С – в ноябре. В нижней части температурных профилей значения остаются практически неизменными: максимальная амплитуда – 0,5 °С. Охлаждение грунтов только верхней части основания говорит о слабой эффективности или неработоспособности СОУ. Сезонно-талый слой не превышает 1 м, что говорит о хорошей работе ПП, благодаря которому, даже в случае отказа СОУ, грунты в основании здания поддерживаются в стабильно мёрзлом состоянии.

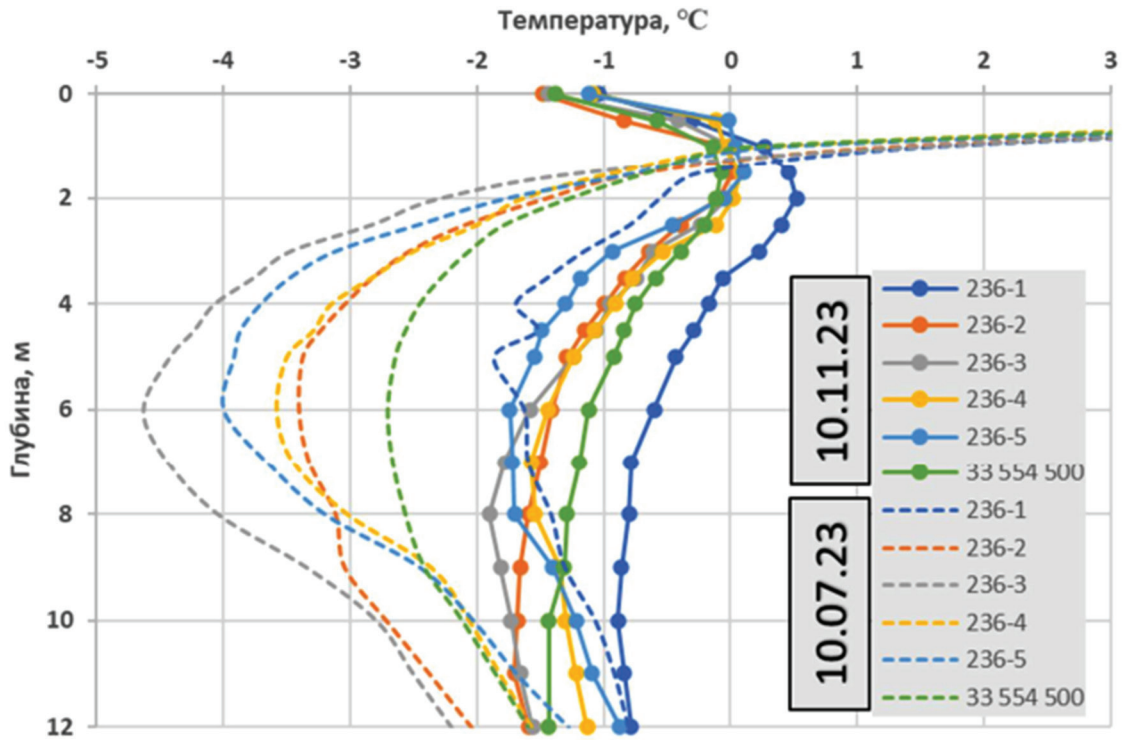


Рис. 3. Температурные профили по глубине под зданием III за 10.07.2023 г. (пунктирные линии) и 10.11.2023 г. (сплошные линии). Шифр кривых – номер термокосы /
Fig. 3. Temperature profiles by depth under building III for 10.07.2023 (dotted lines) and 10.11.2023 (solid lines). The cipher of the curves is the number of the thermowell

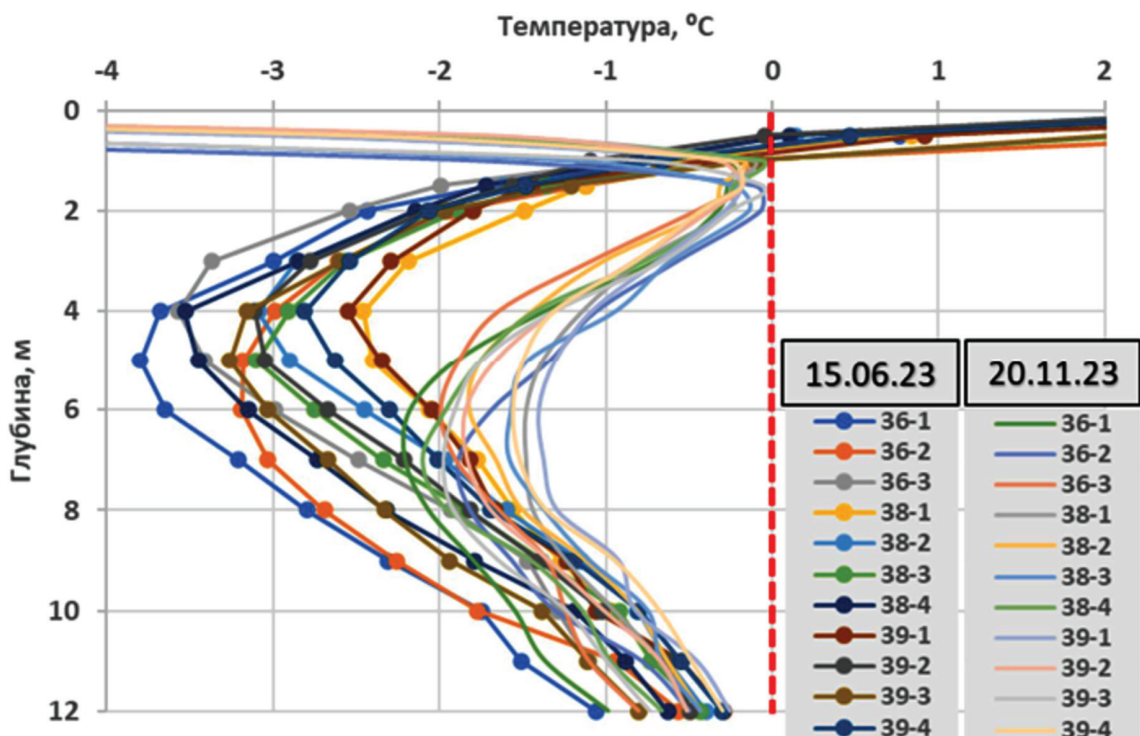


Рис. 4. Температурные профили по глубине под зданием IV за 15.06.2023 г. (линии с маркерами) и 20.11.2023 г. (сплошные линии). Шифр кривых – номер термокосы /
Fig. 4. Temperature profiles by depth under building IV for 15.06.2023 (lines with markers) and 20.11.2023 (solid lines). The cipher of the curves is the number of the thermowell

Таким образом, показана возможность использования амплитуды колебаний температуры грунтового основания и мощности СТС под зданием в качестве критериев эффективности работы системы термостабилизации грунтов: СОУ и ПП. В перспективе приведённые характеристики можно использовать в качестве одного из критериев оценки состояния здания и качества его эксплуатации.

Следующие статистические характеристики рассчитывались для всех 30 объектов капитального строительства. Рассчитаны среднемесячные значения температуры грунтов в основании за ноябрь 2023 г. После получения среднемесячной температуры грунтов для всех датчиков под зданием анализировалось значение на интервале глубин 5–10 м. Рассчитаны среднее, максимальное и минимальное значения среднемесячных температур по всему зданию в целом. Глубины для анализа выбраны как наиболее рабочие

и значимые для стабильности свайного фундамента: сезонно-талый слой не превышает 5 м, а стандартная глубина заложения свай составляет 10 м. Среднемесячные значения рассчитывались для ноября – в этом месяце температуры грунтов близки к максимальным за год.

Схема расположения объектов мониторинга г. Салехарда (разноцветные круглые маркеры) в цветовой гамме, отвечающей средним значениям среднемесячной температуры на глубинах 5–10 м за ноябрь 2023 г., представлена на рис. 5. Для ранжирования зданий принято предельно допустимое значение температуры мёрзлых грунтов под объектами мониторинга, равное $-0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, что соответствует температуре замерзания песка по СП 25.13330.2020, таблица Б.1. Более высокие значения температуры – отклонение от нормы или повышенные, которые окрашивают здание в красный цвет.

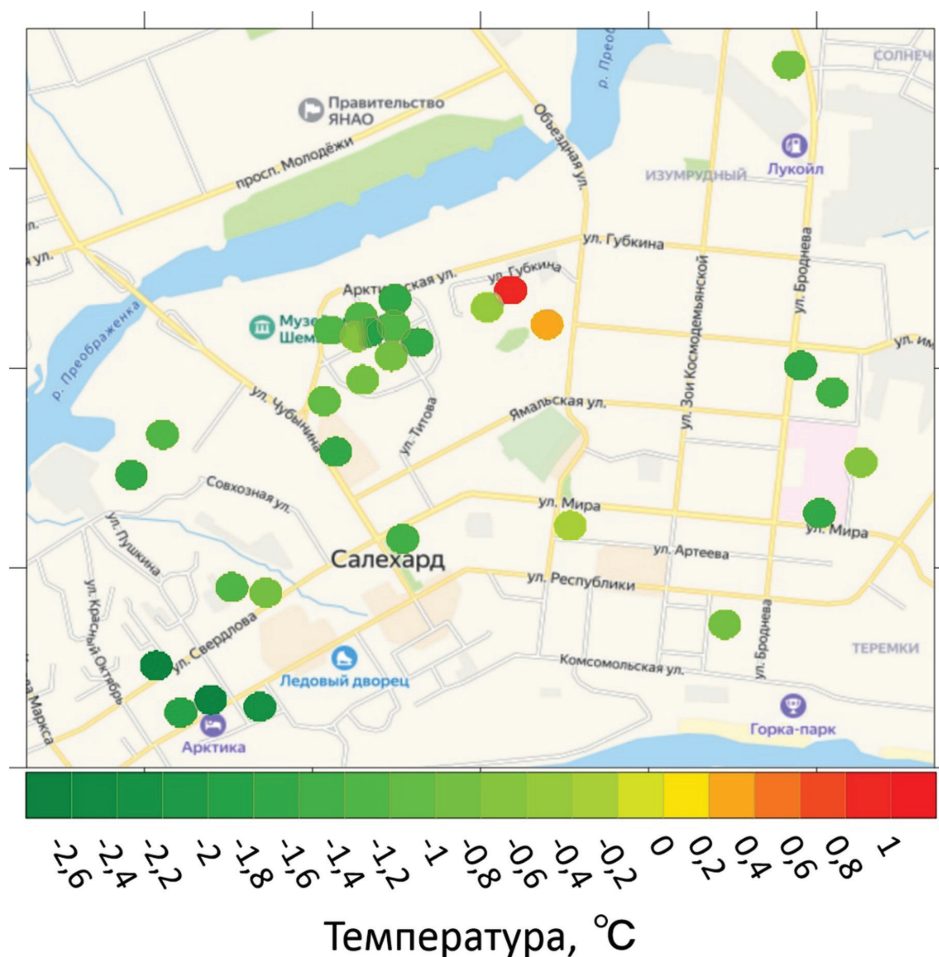


Рис. 5. Схема расположения объектов мониторинга г. Салехарда в цветовой гамме, отвечающей средним значениям среднемесячной температуры, на глубинах 5–10 м за ноябрь 2023 г. / **Fig. 5.** The scheme of the Salekhard monitoring facilities in the color scheme corresponding to the average values of the average monthly temperature at depths of 5–10 m for November 2023

Таким образом, красные тона соответствуют температурам грунтов с очевидными отклонениями от нормы (выше $-0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$), жёлтые – на грани допустимых (от $-0,1$ до $-0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$), оттенки зелёного имеют здания, среднемесячные температуры которых соответствуют норме (ниже $-0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$). При этом стоит понимать, что при приближении к жёлтой зоне каждый объект стоит анализировать индивидуально в соответствии с литологическим строением его грунтового основания, проектной документацией и режимом эксплуатации здания.

При визуальном анализе можно заметить, что повышенные значения температуры грунтов имеют два объекта (см. рис. 5, крас-

ный и оранжевый маркеры в центре схемы). Средние значения температуры здесь составляют $0,86$ и $0,28\text{ }^{\circ}\text{C}$, что явно сигнализирует об их талом состоянии. Одно из обозначенных зданий признано аварийным, где в настоящее время проходят мероприятия по стабилизации состояния грунтов, а второе подлежит капитальной реконструкции. Температура грунтов остальных зданий находится в пределах нормативных значений, составляя от $-0,39$ до $-2,7\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Ещё одна характеристика состояний грунтового основания объекта представлена на рис. 6 – максимальная среднемесячная температура. Анализировались также температуры на глубинах $5\text{--}10\text{ м}$ за ноябрь 2023 г.

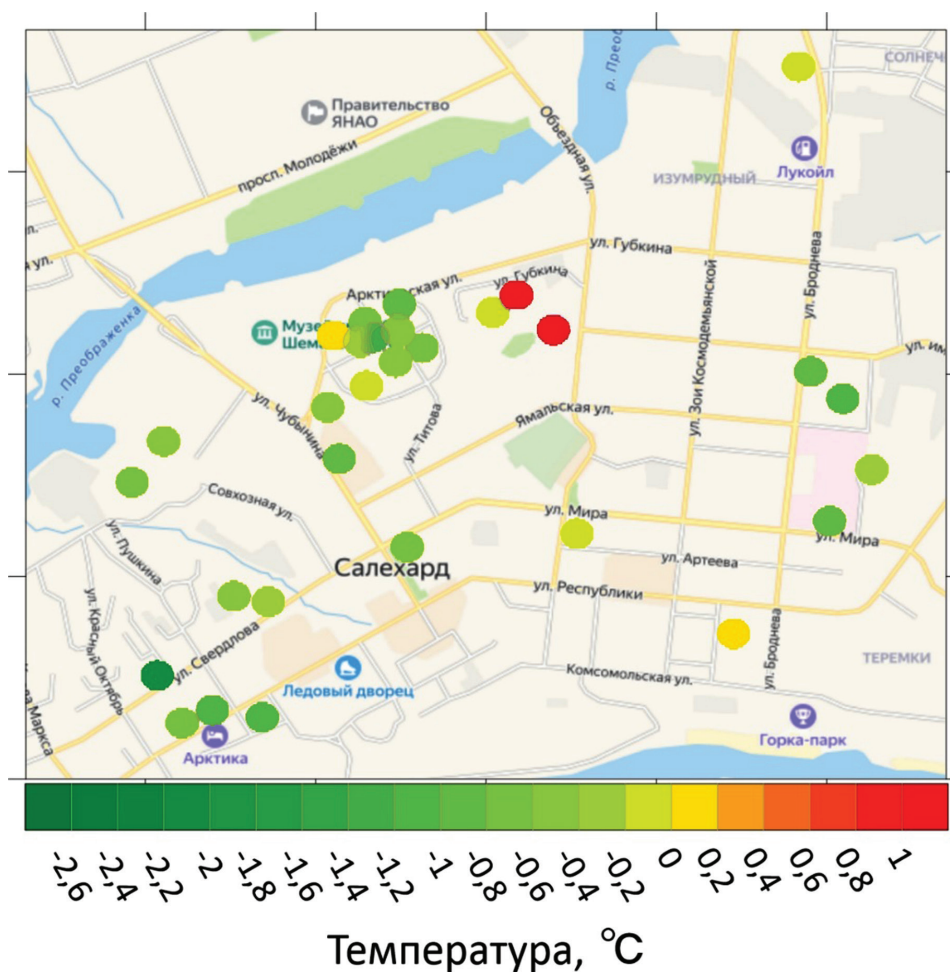


Рис. 6. Схема расположения объектов мониторинга г. Салехарда в цветовой гамме, отвечающей максимальным значениям среднемесячной температуры, на глубинах $5\text{--}10\text{ м}$ за ноябрь 2023 г. /

Fig. 6. The scheme of the Salekhard monitoring facilities in the color scheme corresponding to the maximum values of the average monthly temperature at depths of $5\text{--}10\text{ м}$ for November 2023

Цветовая гамма идентична на рис. 5, 6. Здесь визуально можно заметить смещение цветовых оттенков маркеров в жёлтую область, что сигнализирует о предельно допус-

тимых значениях температуры. Это говорит о существовании скважин (зон/областей) с повышенными значениями температуры в основании таких контролируемых зданий. Тем

не менее, помимо упомянутых ранее двух объектов в красную зону переходят ещё два объекта. Максимальная температура грунтов остальных зданий составляет от 0,1 до -2 °С. Таким образом, несмотря на нормальную обстановку в целом по зданию (исходя из среднего значения), анализируя максимальные значения температуры в основаниях объектов, можно выявлять объекты с ослабленными зонами, ставить их на особый контроль, обнаруживать динамику и причины возникновения температурной аномалии с последующими рекомендациями к мероприятиям по стабилизации ситуации.

В дальнейшем планируется продолжить работы по анализу температурных значений грунтовых оснований объектов капитального строительства, расположенных в г. Салехарде. В дополнение к приведённым в работе нужно проанализировать другие статистические характеристики и параметры температурного поля, полученные с использованием данных температурного мониторинга.

Таким образом, описательная статистика может стать основой для предварительного анализа данных автоматизированного температурного мониторинга. Визуализация статистических характеристик позволяет наглядно представить данные температурного мониторинга и выявить объекты с негативными изменениями в мёрзлом грунтовом основании.

Заключение. Показана возможность использования амплитуды колебаний температуры грунтового основания и мощности СТС под зданием для оценки эффективности работы систем термостабилизации грунтов и режима работы проветриваемого подполья. Ежегодный пересчёт линейного тренда позволяет оценить момент начала перехода

грунтов в талое состояние, что возможно использовать в качестве одного из критериев стабильности грунтового основания и здания в целом.

В результате анализа средних значений среднемесячной температуры оснований фундаментов зданий г. Салехарда на глубинах 5–10 м за ноябрь 2023 г. выявлено два здания с признаками оттаявшего грунтового основания, средние значения температуры которых составляют 0,86 и 0,28 °С. Здания находятся в аварийном и предаварийном состояниях.

Анализируя максимальные значения температуры в основаниях объектов, можно выявлять здания с ослабленными зонами: в красную зону повышенных значений температур перешли ещё два здания, где необходимо контролировать динамику и выявлять возможные причины возникновения этих областей.

Система автоматизированного контроля температуры грунтов оснований объектов капитального строительства в г. Салехарде, которая насчитывает более 300 термометрических скважин под 34 капитальными объектами округа, является эффективным инструментом для контроля температуры мёрзлых грунтовых оснований зданий.

Приведённый набор критериев позволит выявлять объекты с негативными изменениями в мёрзлом грунтовом основании. Предложенные статистические характеристики могут послужить основой для автоматизации процесса первичной обработки и визуального представления данных температурного мониторинга, что значительно упростит их использование для любой эксплуатирующей организации.

Список литературы

1. Горелик Я. Б., Паздерин Д. С. Корректность постановки и решения задач по прогнозу динамики температурных полей в основании сооружений на многолетнемёрзлых грунтах // Криосфера Земли. 2017. Т. 21, № 3. С. 49–59.
2. Громадский А. Н., Арефьев С. В., Камнев Я. К., Синицкий А. И. Дистанционный контроль за температурным режимом вечномёрзлых грунтов под зданиями г. Салехард // Научный вестник ЯНАО. 2019. № 3. С. 17–21.
3. Демидов Н. Э., Гунар А. Ю., Бакихин Е. И., Гагарин В. Е., Гузева А. В., Дежникова А. А., Казанцев В. С., Кошурников А. В., Нарижная А. И. Строение, газосодержание и термическое состояние многолетних бугров пучения (булгунняхов) в долине р. Вась-Юган (окрестности г. Салехард, Западная Сибирь) // Геофизические процессы и биосфера. 2022. Т. 21, № 3. С. 27–38.
4. Курилко А. С., Хохолов Ю. А., Дроздов А. В., Соловьев Д. Е. Геотермический контроль грунтов основания копров и устьевой части вертикальных стволов на примере алмазодобывающего рудника «Удачный» (Якутия) // Криосфера Земли. 2017. Т. 21, № 5. С. 82–91.
5. Порфирьев Б. Н., Елисеев Д. О., Стрелецкий Д. А. Экономическая оценка последствий деградации вечной мерзлоты для жилищного сектора российской Арктики // Вестник Российской академии наук. 2021. Т. 91, № 2. С. 105–114.

6. Порфирьев Б. Н., Елисеев Д. О., Стрелецкий Д. А. Экономическая оценка последствий деградации вечной мерзлоты под влиянием изменений климата для устойчивости дорожной инфраструктуры в российской Арктике // Вестник Российской академии наук. 2019. Т. 89, № 12. С. 1228–1239.
7. Стетюха В. А. Эффективность использования подземного пространства в суровых климатических условиях // Вестник Забайкальского государственного университета. 2022. Т. 28, № 8. С. 6–17.
8. Стрелецкий Д. А., Шикломанов Н. И., Гребенец В. И. Изменение несущей способности мёрзлых грунтов в связи с потеплением климата на севере Западной Сибири // Криосфера Земли. 2012. Т. 16, № 1. С. 22–32.
9. Шейн А. Н., Камнев Я. К. Обзор научных и производственных работ по изучению многолетне-мёрзлых пород в естественных и антропогенных условиях // Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа. 2020. № 3. С. 42–50.
10. Filimonov M. Y., Kamnev Y. K., Shein A. N., Vaganova N. A. Modeling the Temperature Field in Frozen Soil under Buildings in the City of Salekhard Taking into Account Temperature Monitoring // Land. 2022. No. 11.
11. Zhang Hu, Zhang Jianming, Wangb Enliang, Zhang Mingyi, Zhang Zhilong, Mingtang Chai. Analysis of thermal regime under riverbank in permafrost region // Applied Thermal Engineering. 2017. Vol. 123. P. 963–972.
12. Kamnev Y. K., Filimonov M.Yu., Shein A. N., Vaganova N. A. Automated monitoring the temperature under buildings with pile foundations in Salekhard // Geography, Environment, Sustainability. 2021. Vol. 14, no. 4. P. 75–82.
13. Suter L., Streletskiy D., Shiklomanov N. Assessment of the cost of climate change impacts on critical infrastructure in the circumpolar Arctic // Polar Geography. 2019. Vol. 42, is. 4. P. 267–286.
14. Melnikov V. P., Osipov V. I., Brouchkov A. V. Development of geocryological monitoring of undisturbed and disturbed Russian permafrost areas on the basis of geotechnical monitoring systems of the energy industry // Earth's Cryosphere. 2022. Vol. 26. P. 3–15.
15. Romanovsky V. E., Osterkamp T. E. Permafrost: Changes and impacts // Permafrost Response on Economic Development, Environmental Security and Natural Resources. Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2001. P. 297–315.
16. Streletskiy D. A., Suter L. J., Shiklomanov N. I., Porfiriev B. N., Eliseev D. O. Assessment of climate change impacts on buildings, structures and infrastructure in the Russian regions on permafrost // Environ. Res. Lett. 2019. Vol. 14, no. 2.

References

1. Gorelik Ya. B., Pazderin D. S. Correctness of setting and solving problems for predicting the dynamics of temperature fields at the base of structures on permafrost soils. Cryosphere of the Earth, vol. 21, no. 3. pp. 49–59, 2017. (In Rus.)
2. Gromadsky A. N., Arefyev S. V., Kamnev Ya. K., Sinitzky A. I. Remote control over the temperature regime of permafrost soils under buildings in Salekhard. Scientific Bulletin of the Yamalo-Nenets Autonomous District, no. 3, pp. 17–21, 2019. (In Rus.)
3. Demidov N. E., Gunar A.Yu., Balikhin E. I., Gagarin V. E., Guzeva A. V., Dezhnikova A. A., Kazantsev V. S., Koshurnikov A. V., Narizhnaya A. I. Structure, gas content and thermal state of perennial heave mounds (bulgunnyakhs) in the valley of the Vasyugan river (vicinity of the city Salekhard, Western Siberia). Geophysical Processes and the Biosphere, vol. 21, no. 3, pp. 27–38, 2022. (In Rus.)
4. Kurilko A. S., Khokholov Yu. A., Drozdov A. V., Solovoyov D. E. Geothermal soil control of the base of copres and the mouth of vertical shafts on the example of the Udachny diamond mine (Yakutia). Cryosphere of the Earth, vol. 21, no. 5, pp. 82–91, 2017. (In Rus.)
5. Porfiriev B. N., Eliseev D. O., Streletsky D. A. Economic assessment of the consequences of permafrost degradation for the housing sector of the Russian Arctic. Bulletin of the Russian Academy of Sciences, vol. 91, no. 2, pp. 105–114, 2021. (In Rus.)
6. Porfiriev B. N., Eliseev D. O., Streletsky D. A. Economic assessment of the consequences of permafrost degradation under the influence of climate change for the sustainability of road infrastructure in the Russian Arctic. Bulletin of the Russian Academy of Sciences, vol. 89, no. 12, pp. 1228–1239, 2019. (In Rus.)
7. Stetyukha V. A. Efficiency of using underground space in harsh climatic conditions. Transbaikal State University Journal, vol. 28, no. 8, pp. 6–17, 2022. (In Rus.)
8. Streletsky D. A., Shiklomanov N. I., Grebenets V. I. Change in the bearing capacity of frozen soils due to climate warming in the north of Western Siberia. Cryosphere of the Earth, vol. 16, no. 1, pp. 22–32, 2012. (In Rus.)
9. Shein A. N., Kamnev Ya. K. Review of scientific and industrial works on the study of permafrost rocks in natural and anthropogenic conditions. Scientific Bulletin of the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug, no. 3, pp. 42–50, 2020. (in Rus.)
10. Filimonov M. Y., Kamnev Y. K., Shein A. N., Vaganova N. A. Modeling the Temperature Field in Frozen Soil under Buildings in the City of Salekhard Taking into Account Temperature Monitoring. Land, no. 11, 2022. (in Eng.)

11. Zhang Hu, Zhang Jianming, Wangb Enliang, Zhang Mingyi, Zhang Zhilong, Mingtang Chai. Analysis of thermal regime under riverbank in permafrost region. *Applied Thermal Engineering*, vol. 123, pp. 963–972, 2017. (In Eng.)
12. Kamnev Y. K., Filimonov M.Yu., Shein A. N., Vaganova N. A. Automated monitoring the temperature under buildings with pile foundations in Salekhard. *Geography, Environment, Sustainability*, vol. 14, no. 4, pp. 75–82, 2021. (In Eng.)
13. Suter L., Streletskiy D., Shiklomanov N. Assessment of the cost of climate change impacts on critical infrastructure in the circumpolar Arctic. *Polar Geography*, vol. 42, is. 4, pp. 267–286, 2019. (In Eng.)
14. Melnikov V. P., Osipov V. I., Brouchkov A. V. Development of geocryological monitoring of undisturbed and disturbed Russian permafrost areas on the basis of geotechnical monitoring systems of the energy industry. *Earth's Cryosphere*, vol. 26, pp. 3–15, 2022. (In Eng.)
15. Romanovsky V. E., Osterkamp T. E. Permafrost: Changes and impacts. *Permafrost Response on Economic Development, Environmental Security and Natural Resources*. Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2001. P. 297–315. (In Eng.)
16. Streletskiy D. A., Suter L. J., Shiklomanov N. I., Porfiriev B. N., Eliseev D. O. Assessment of climate change impacts on buildings, structures and infrastructure in the Russian regions on permafrost. *Environ. Res. Lett.*, vol. 14, no. 2, 2019. (In Eng.)

Информация об авторах

Шейн Александр Николаевич, канд. физ.-мат. наук, доцент, ведущий научный сотрудник сектора криосферы, Научный центр изучения Арктики, г. Салехард, Россия; A.N.Shein@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6520-0551>. Область научных интересов: численное моделирование электромагнитных и температурных полей, криолитозона, геотехнический мониторинг, импульсная электроразведка, электротомография, георадиолокация, процессы вызванной поляризации.

Башкова Анна Александровна, научный сотрудник сектора криосферы, Научный центр изучения Арктики, г. Салехард, Россия; Институт криосферы Земли Тюменского научного центра Сибирского отделения Российской академии наук, г. Тюмень, Россия; AABashkova@yanao.ru; <https://orcid.org/0009-0007-1489-0701>. Область научных интересов: Арктика, мерзлотоведение, гидрогеология, строительство.

Information about the authors

Shein Alexander N., candidate of physico-mathematical sciences, associated professor, leading researcher, Cryosphere Sector, Arctic Research Center, Salekhard, Russia; A.N.Shein@yandex.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6520-0551>. Research interests: numerical modeling of electromagnetic and temperature fields, cryolithozone, geotechnical monitoring, transient electromagnetics, electrical resistivity tomography, ground penetrating radar, induced polarization.

Bashkova Anna A., researcher, Cryosphere Sector, Arctic Research Center, Salekhard, Russia; Institute of the Earth's Cryosphere, Tyumen Scientific Center, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences Russia, Tyumen, Russia; AABashkova@yanao.ru; <https://orcid.org/0009-0007-1489-0701>. Research interests: Arctic, permafrost, hydrogeology, construction.

Вклад авторов в статью

Шейн А. Н. – концепция исследования, обработка данных, написание и редактирование текста, оформление графики.

Башкова А. А. – написание и редактирование текста.

Authors' contribution to the article

Shein A. N. – research concept, analysis of results, writing and editing of text, graphic design.

Bashkova A. A. – writing and editing of the text.

Для цитирования

Шейн А. Н., Башкова А. А. Статистические характеристики данных температурного мониторинга грунтовых оснований фундаментов зданий города Салехарда за 2018–2023 годы как основа для автоматизации процесса первичной обработки данных // *Вестник Забайкальского государственного университета*. 2024. Т. 30, № 3. С. 58–69. DOI: 10.21209/2227-9245-2024-30-3-58-69.

For citation

Shein A. N., Bashkova A. A. Statistical Characteristics of the Data of Temperature Monitoring of the Soil Bases of the Foundations of Buildings in Salekhard for 2018–2023 as a Basis for Automating the Process of Primary Data Processing // *Transbaikal State University Journal*. 2024. Vol. 30, no. 3. P. 58–69. DOI: 10.21209/2227-9245-2024-30-3-58-69.